

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

DÉTERMINATION DU POTENTIEL DE CROISSANCE DU PEUPLIER
FAUX-TREMBLE (*POPULUS TREMULOIDES* MICHX.) À L'ÉCHELLE DE
L'UNITÉ D'AMÉNAGEMENT FORESTIER EN
HAUTE-MAURICIE, QUÉBEC, CANADA

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR
JEAN-FRANÇOIS DUPUIS

Janvier 2009

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

Remerciements

Merci à Monsieur David Paré, chercheur au Service canadien des forêts, pour m'avoir transmis cette minutie et cette conscience forestière et scientifique. De nos simples conversations téléphoniques à nos rencontres mensuelles, merci d'avoir pris tout ce temps pour mener à terme cette étude. Un merci tout spécial à Madame Mireille Bouchard, professeure au département de géographie de l'UQAM, pour m'avoir enseigné tout au long de ma recherche comment faire passer un message scientifique et pour m'avoir encouragé tout au long de ce mémoire. J'aimerais aussi porter mon attention sur une personne qui fut mon mentor et un phare tout au long de ma maîtrise, monsieur Patrick Lamoureux sans qui ma compréhension de ce cheminement aurait été vaine.

Merci à monsieur Olivier Caron pour nos discussions animées sur le fameux sujet de la foresterie et pour son aide précieuse en cartographie dans lequel il excelle grandement. Merci à mes deux comparses d'étude, Marilou Fleury et Daniel Brosseau pour leur soutien tout au long de ces dernières années et surtout félicitations pour leur maîtrise!

J'aimerais aussi remercier le Centre de Foresterie des Laurentides pour leur générosité et pour m'avoir permis d'utiliser les données du MRNQ. Merci à Rémi St-Amant pour m'avoir fourni les données climatiques ainsi qu'à Luc Guindon, cartographe et géomaticien pour m'avoir aidé à gérer cette base de données.

Le soutien financier du FQRNT et du CRSNG, en collaboration avec les compagnies Louisiana et Abitibi/ Bowater, m'a été très précieux.

Un merci tout spécial à ma famille pour m'avoir encouragé tout au long de mes études. Ils ont cru en moi depuis le commencement! Finalement, le plus grand des mercis à mon épouse sans qui, rien n'aurait été possible. Pour ton soutien, ta solidarité et ton amour, je te remercie du fond du cœur!

Merci à tous de m'avoir soutenu dans cette aventure...

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
RESUME	viii
 INTRODUCTION.....	 1
 CHAPITRE I	
LES NOUVELLES ORIENTATIONS DE L'EXPLOITATION FORESTIÈRE AU QUÉBEC. L'OBJECTIF DU MEMOIRE	 3
1.1 Le zonage fonctionnel	3
1.2 L'identification des sites les plus productifs.....	5
1.3 L'objectif de la recherche.....	9
 CHAPITRE II	
MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	12
2.1 Le terrain d'étude	12
2.2 Le choix du peuplier faux-tremble comme essence indicatrice de qualité du site	15
2.3 Les placettes-échantillons	16
2.4 Identification des indicateurs susceptibles d'expliquer l'IQS du peuplier faux- tremble à l'échelle de l'UAF	16
2.5 Acquisition de données.....	20
2.6 Description des variables retenues.....	21
2.7 Calcul de l'Indice de Qualité des Stations	24

2.8 Traitements statistiques des données et modes d'élaboration du modèle....	25
---	----

CHAPITRE III

RÉSULTATS	28
3.1 Généralités	28
3.2 Analyses des corrélations simples	30
3.3 Régressions multiples	31
3.4 Relations entre les variables	32
3.5 Arbre de classification	36
3.6 Lithologie et éléments nutritifs	37

CHAPITRE IV

DISCUSSION.....	40
4.1 Variabilité vs superficie	40
4.2 Notion d'échelle	41
4.3 Autécologie du peuplier faux-tremble	42
4.4 L' IQS représente-t-il bien le potentiel de productivité d'un site?	44
CONCLUSION	45
BIBLIOGRAPHIE	51

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1. Localisation des placettes-échantillons gouvernementales	13
2. Moyenne, écart-type, minimum et maximum de l'IQS par lithologie, classes de drainage, dépôts de surface et domaines bioclimatiques	29
3. Analyse Pas à Pas : graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues (12 variables)	31
4. Analyse en composantes principales (ACP) sur l'ensemble des données ...	33
5. Analyse Pas à Pas : graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues (4 variables)	35

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1. Valeurs des coefficients de b_1 à b_5 de l'équation de Pothier et Savard (1998) pour le peuplier faux-tremble	7
2. Portrait global des unités de paysage	14
3. Tableau synthèse des données écoforestières, topographiques, climatiques et pédologiques des parcelles retenues des UAF 042-51 et 022-51, en Haute-Mauricie	17
4. Corrélations simples (IQS vs variables impliquées)	30
5. Corrélations des différentes variables climatiques, topographiques et écoforestières.....	32
6. Résultats de l'ACP	34
7. Synthèse de la modélisation arborescente	36
8. Moyenne et écart-type des éléments nutritifs sur l'ensemble du territoire ...	37
9. Rapports des éléments nutritifs de la roche/lithologie en comparaison avec les concentrations optimales du feuillage du peuplier hybride	38

RESUME

Dans le but de développer un outil permettant de déterminer les sites à haut potentiel de croissance, les relations entre l'IQS du peuplier faux-tremble de 178 placettes-échantillons et des variables biophysiques disponibles sur l'ensemble d'un territoire de la Haute-Mauricie furent étudiées. Les attributs topographiques, climatiques, écoforestiers, géochimiques et physiques du sol ont été analysés. Des analyses de régressions simples et multiples démontrent un faible pouvoir de prédiction de l'IQS. La méthode de l'arbre de régression basée sur les mêmes variables ne permet pas non plus de bien discriminer les variables influençant positivement la croissance du peuplier car la moyenne de mauvaise classification s'élève à 39,78%. L'IQS varie faiblement en fonction du calcium et du drainage. Ces deux variables, dans les analyses de régressions simples et multiples, prédisent à 8% la variabilité de l'IQS mais la force des différents modèles ne démontre pas une robustesse pouvant être appliquée à l'échelle du territoire étudié, un territoire qui présente des caractéristiques homogènes au niveau de la géologie, des dépôts de surface et du drainage. Toutefois, il ressort que la croissance du peuplier faux-tremble est favorisée lorsque le drainage est adéquat (modéré à imparfait) et que la concentration de calcium est suffisante. Une analyse détaillée de la variation spatiale du drainage et du calcium serait une avenue intéressante à exploiter.

Mots-clefs : Peuplier faux-tremble, potentiel de croissance, arbre de classification, DTREG, unité d'aménagement forestier

INTRODUCTION

Depuis quelques années la gestion de la forêt suscite de vifs débats dans la société québécoise, reflétant des problèmes de conciliation entre les valeurs écologiques et socio-économiques rattachées à la forêt. Les médias ont alimenté les craintes de surexploitation de cette ressource et des impacts des coupes, alors que les compagnies forestières et la population qui vit de la forêt redoutent un effondrement de cette industrie. Bref, la conciliation entre les milieux écologiques et socio-économiques est difficile. De plus, la remise en question d'une gestion de la forêt basée strictement sur la production de fibres et la nécessité de dédier de plus grands territoires à la conservation se fait de plus en plus incontournable suite à des accords comme la convention de Rio (Organisation des Nations Unies 1993).

Aussi, le 23 octobre 2003, le gouvernement du Québec a mis sur pied une commission d'enquête sur la gestion des forêts québécoises, qui avait entre autres mandats d'étudier les plans d'aménagement forestiers et de proposer des avenues visant la bonification des régimes forestiers. En décembre 2004 la Commission a émis ses recommandations dans son rapport final (Coulombe et al. 2004). Il y est suggéré de réduire la possibilité forestière de la forêt boréale de 20 %, d'instaurer un aménagement écosystémique pour la majeure partie du territoire sous aménagement et aussi un zonage fonctionnel, espérant ainsi concilier les besoins des différents milieux concernés par la forêt québécoise. Parmi les 81 recommandations sur la gestion durable de la forêt, les trois suivantes retiennent particulièrement notre attention. Elles proposent « Que l'aménagement écosystémique soit au cœur de la gestion des forêts publiques du Québec. » (Recommandation 4.1), « Que le régime forestier fasse une place importante à la protection et à la mise en valeur des paysages, notamment par le biais d'un nouveau *Règlement sur l'aménagement*

durable des forêts, et que les modalités particulières soient définies par les commissions forestières régionales. » (Recommandation 4.8) et « que le Ministère mette en œuvre une stratégie de sylviculture intensive visant l'accroissement des rendements ligneux, par le biais de projets particuliers sur des sites à fort potentiel, tant en forêts publiques que privées. » (Recommandation 6.7) (Coulombe et al. 2004).

La protection de certaines portions du territoire ainsi que la mise en place de l'aménagement écosystémique amèneront inévitablement une diminution des coupes forestières actuelles. L'application de ces recommandations pourrait avoir des conséquences sociales et économiques importantes dans plusieurs régions du Québec, si aucune solution n'est trouvée pour réduire ces impacts. Il faut réagir rapidement et trouver des méthodes immédiatement applicables pour planifier un zonage fonctionnel afin de mieux gérer la productivité forestière sur une échelle réduite. C'est ainsi qu'à long terme, la gestion forestière bénéficiera de plus en plus de l'appui de la société et protégera l'environnement de manière responsable.

CHAPITRE I

LES NOUVELLES ORIENTATIONS DE L'EXPLOITATION FORESTIÈRE AU QUÉBEC. L'OBJECTIF DU MÉMOIRE

1.1 Le zonage fonctionnel

La gestion durable des forêts est maintenant devenue une nécessité incontournable au Québec. Mais comment y arriver ? Plusieurs chercheurs au Canada et aux États-Unis se sont penchés sur la question et ont tenté de proposer des modes d'exploitation qui visent une gestion durable des forêts tout en tentant d'amoindrir les effets négatifs sur l'économie liée à cette ressource.

C'est ainsi que, vers la fin des années 1980, apparaît l'idée d'un zonage du territoire forestier en fonction de l'écologie, de la vocation sociale ou de la production. Walther (1986), Davis et Johnson (2006), Haas et al. (1987) proposèrent une gestion différente de la forêt, soit une subdivision du territoire selon les différentes capacités forestières, et ce, afin de l'exploiter au maximum: c'est le zonage fonctionnel. En 1992, Seymour et Hunter (1992) proposèrent une structure à trois zones d'utilisation, connue sous le terme de TRIADE. L'aménagement forestier proposé par la TRIADE subdivise le territoire en trois zones bien distinctes visant à rendre l'exploitation forestière viable et durable. Une première partie du territoire est délimitée pour la conservation intégrale de la forêt : aucune coupe forestière n'y est pratiquée. Une seconde zone est régie par l'aménagement écosystémique. Ce type d'aménagement « vise, par une approche écologique appliquée à l'aménagement forestier, à assurer le

maintien de la biodiversité et de la viabilité de l'ensemble des écosystèmes forestiers, tout en répondant à des besoins socio-économiques, dans le respect des valeurs sociales liées au milieu forestier » (Coulombe et al. 2004). Finalement, une troisième zone tend vers la ligniculture, soit l'exploitation intensive de la forêt. En appliquant cette stratégie, une perte de matière ligneuse par unité de surface est anticipée, à cause des zones d'aménagement écosystémique et de conservation. L'aménagement forestier intensif de la troisième zone devra compenser les pertes de production de matière ligneuse suite à l'instauration des deux premières zones. Le concept de la TRIADE, proposé par Seymour et Hunter (1992) constitue une approche qui gagne en popularité car elle propose des moyens de maintenir la possibilité forestière ou du moins de limiter les baisses d'approvisionnement tout en atteignant des objectifs de conservation plus ambitieux. Récemment, Messier et al. (2002) ajoutèrent une autre zone à celles proposées par la TRIADE, soit une zone dite « super-intensive » vouée à la ligniculture. Dans cette quatrième zone on propose l'implantation d'essences à croissance rapide pour ainsi gagner en productivité.

Les zones sont déterminées en fonction de leur possibilité de rendement, ce qui exige une compréhension de la capacité écologique de la ressource et des résultats escomptés à long terme (Walther 1986). La capacité des intervenants à déterminer les trois ou quatre zones est donc liée à la connaissance du territoire.

Étonnamment, il existe peu d'exemples d'application d'aménagement de type TRIADE. Les travaux menés sur le zonage fonctionnel depuis les années 1990 se sont attardés au développement de modèles théoriques sans application sur le terrain (Boyland et al. 2004, Doyon et al. 2004). Les quelques essais menés sur le terrain l'ont été surtout à petite échelle, et n'ont pas pris en compte la variété des facteurs du milieu naturel qui influencent la croissance de la forêt. En 2004, un projet

expérimental pilote de grande envergure sur le zonage fonctionnel pour l'unité d'aménagement 042-51 dans la région de La Tuque, QC, a été initié par un groupe de chercheurs multidisciplinaires, sous la direction du professeur Christian Messier, de l'Université du Québec à Montréal. Ce projet, appelé TRIADE, regroupe en fait 70 parties prenantes, soit l'ensemble des industries forestières de la région, mais aussi des groupes environnementaux, ZEC, pourvoiries et communautés autochtones, bref un bon nombre d'acteurs qui interviennent tous dans différentes sphères reliées à la forêt boréale québécoise. En bout de ligne, les promoteurs du projet espèrent « pouvoir atteindre 1) des pratiques forestières plus durables; 2) une utilisation plus polyvalente des multiples services et ressources que fournit la forêt; 3) le maintien dans la mesure du possible des volumes de bois récoltable; 4) le maintien des caractéristiques d'habitats importantes pour la biodiversité; et 5) une meilleure conciliation entre les exigences environnementales et celles du marché » (Messier et al. 2002). Par son aspect novateur, on s'attend à ce que ce projet soit un point tournant en aménagement forestier qui entraînera un changement important dans les façons de faire dans l'industrie forestière au Québec.

1.2 L'identification des sites les plus productifs

L'aménagement intensif de la forêt, ou ligniculture, nécessite de lourds investissements, et il est primordial d'identifier les territoires qui y sont le plus propices, soit les secteurs possédant le meilleur potentiel de croissance de l'espèce d'arbre envisagée.

Depuis bientôt près de trente ans, l'indice de qualité des stations (IQS) ou site index (SI) est la méthode la plus courante utilisée pour évaluer la productivité forestière

(Carmear 1975). Fondamentalement, cette méthode propose deux usages distincts. Premièrement, l'IQS aide à estimer la hauteur d'un arbre pour un âge donné à partir d'un IQS et deuxièmement, à estimer l'IQS à l'aide de la hauteur pour un âge donné (Wang et Payandeh 1995).

Pothier et Savard (1998) ont actualisé la formule permettant de calculer l'IQS et en ont proposé une qui permet de prédire et caractériser le rendement à 50 ans, de plusieurs essences. Elle s'écrit comme suit :

$$IQS = b \cdot H_d^{b_2} \cdot 1 - e^{-b_3 A_c} \cdot k_{b_4 H_d^{b_5}}$$

où :

IQS indice de qualité de station (m à 50 ans)

H_d hauteur dominante (m)

A_c âge corrigé à une hauteur de référence de 1 m.

Le coefficient b dépend de l'espèce d'arbre. Le tableau 1 donne les valeurs de b pour le peuplier faux-tremble qui sera, nous le verrons plus loin, notre essence indicatrice pour les sites à croissance optimale.

Tableau 1. Valeurs des coefficients de b_1 à b_5 de l'équation de Pothier et Savard (1998) pour le peuplier faux-tremble

b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
0,5917	1,044	0,01530	1,226	0,2210

Repris de Pothier et Savard, 1998

L'équation de Pothier et Savard (1998) a donc pour fonction de calculer la possibilité forestière d'une placette-échantillon, plus particulièrement les peuplements à structure équiennne.

Mais qu'est-ce qui détermine l'Indice de Qualité de Sites (IQS) ? Depuis les dix dernières années, quelques chercheurs canadiens ont tenté de le déterminer. Certains chercheurs ont caractérisé la qualité du site en fonction de l'IQS, mais ont aussi tenté de déterminer les facteurs environnementaux favorisant la croissance de l'essence à l'étude.

Ung et al. (2001) ont élaboré un modèle de croissance qui est applicable aux essences de la forêt boréale intolérantes à l'ombre, comme le peuplier faux-tremble. Ils ont considéré quatre variables climatiques qui pourraient influencer la croissance : les degré-jours, le déficit de pression de vapeur, l'indice d'aridité et les précipitations utiles. Ensuite, ils ont utilisé une seule variable édaphique, soit la capacité de rétention d'eau dans le sol. Les résultats qu'obtiennent ces chercheurs sont concluants et présentent une alternative intéressante afin de déterminer la qualité d'un site. Cette méthode peut donc être très efficace si annexée à un système d'information géographique (Ung et al. 2001). Le peuplier faux-tremble semble très bien réagir aux intrants climatiques et édaphiques préalablement mentionnés. Le r^2 ajusté du peuplier (r^2 adj.=0.72) présente un résultat très probant puisque le modèle associé réussit à

expliquer 72% de la variation de la variable dépendante. Ce coefficient de détermination est lié avec le premier modèle construit basé sur l'index des sites biophysiques complets. Le coefficient de détermination produit par le deuxième modèle; celui de l'index des sites biophysiques réduits, est légèrement à la baisse, mais demeure explicatif ($r^2=0,69$) (Ung et al. 2001). Avec ces résultats, il serait donc efficace d'y jumeler un système d'information géographique afin de rendre accessibles les sites ayant un plus fort potentiel de croissance.

Chen et al. (2002) ont proposé une méthode plus appliquée, plus adaptée au type de territoire. Ils ont calculé l'IQS de la même façon que les auteurs précédents, soit le diamètre à hauteur de poitrine (dhp) majoré à un mètre ou 1,3 mètre, l'âge et la hauteur, mais ces scientifiques introduisent bon nombre de nouvelles variables pouvant influencer la croissance. Outre les facteurs climatiques comme les précipitations, le déficit de pression de vapeur, l'indice d'aridité, les degré-jours et la capacité de rétention d'eau dans le sol, des données sur la zone biogéoclimatique, la latitude, la longitude, l'altitude, le régime nutritif du sol, l'orientation de la pente ainsi que le régime hydrique du sol ont été incorporées dans les analyses statistique. Cette étude a été faite en Colombie-Britannique et les sites échantillonnés ont été délibérément choisis pour prendre les plus grandes variations du climat, des caractéristiques pédologiques et des concentrations de nutriments dans le sol (Chen et al. 2002). Comme cette étude propose une avenue axée sur les relations bioclimatiques, les résultats seront très variables à l'échelle d'une province. Ces auteurs concluent donc brièvement en démontrant que, à l'intérieur d'une même zone biogéoclimatique, les modèles développés prévoient plus efficacement la qualité du site où se trouveront les peupliers faux-tremble.

À l'opposé, les relations entre les différents intrants biologiques sont beaucoup plus faibles à l'échelle de la province. Les résultats finaux sont très probants, le modèle le plus efficace propose une relation de $r^2=82\%$ sans être biaisé tout en prédisant la qualité du site précisément (Chen et al. 2002). Les différentes conclusions apportées par ces chercheurs sont utiles pour des études futures. En effet, certaines conclusions proposent une variation spatiale de la croissance. Avec un modèle de prédiction efficace à 82 %, tenter de spatialiser un patron de croissance est justifiable seulement si les variables indépendantes sont spatialisées. Les points majeurs qui ressortent de l'étude sont que la croissance du peuplier faux-tremble en Colombie-Britannique augmente lorsque la latitude et la longitude diminuent, mais la relation entre l'altitude et la croissance varie considérablement en fonction de la zone biogéoclimatique (Chen et al. 2002). De plus, une augmentation des nutriments et de l'humidité dans le sol favorisent une meilleure croissance du peuplier faux-tremble, mais un surplus d'eau dans le site diminue nettement la croissance (Chen et al. 2002). Il s'agit cependant de grandes tendances de croissance et il faut comprendre que ces tendances ne seront pas visibles à l'échelle de la placette-échantillon.

1.3 L'objectif de la recherche

Le projet TRIADE en Haute-Mauricie vise à développer une approche de gestion durable des forêts à l'aide d'un zonage fonctionnel qui divise le territoire en trois zones, dont une zone de sylviculture intensive et de ligniculture, les deux autres zones étant réservées à la conservation et à l'aménagement écosystémique. C'est sur la zone vouée à la sylviculture qu'intervient plus spécifiquement notre recherche. Pour délimiter les zones les plus propices à ce type de vocation, il faut d'abord déterminer où croîtra le mieux l'espèce qui y sera plantée, et ce à l'échelle de l'unité

d'aménagement forestier. Bref, il faut trouver quels sont les facteurs qui contribuent à la croissance optimale et au rendement des plantations ultra-intensives et intensives.

Nous avons vu que le potentiel de croissance des sites forestiers est bien connu selon de grands gradients de climat ou de sol (Chen et al. 2002, Ung et al. 2001). À l'échelle provinciale, les gradients de température, d'altitude ou de latitude ou encore les grandes unités géologiques influençant la richesse des sols ressortent très clairement. Cependant pour l'implantation d'un aménagement comprenant un zonage comme la TRIADE (Seymour et Hunter, 1992) et à l'intérieur d'une unité de gestion, où le territoire est homogène, des variables locales (e.g. dépôts de surface, drainage, degrés-jours, etc.) ou des combinaisons de variables pourraient déterminer les gradients de productivité. Pour cette échelle, il manque un outil permettant d'évaluer le rôle que jouent des variables locales dans la productivité de la forêt.

Dans ce contexte, l'objectif principal de ce mémoire est d'explorer les liens entre les variables biophysiques actuellement disponibles et cartographiables et la productivité potentielle des sites à une échelle régionale, plus précisément à l'échelle de l'unité d'aménagement forestier. La croissance en hauteur de tiges de peuplier faux-tremble sera utilisée comme variable indicatrice de la productivité du site. La méthode que nous développerons sera basée sur l'analyse des facteurs biophysiques affectant l'indice de qualité des stations (IQS), en utilisant une approche bio-statistique et géospatiale. Le bien fondé et l'intérêt de transmettre ces relations sous forme cartographique dépendra des résultats et pourrait faire l'objet d'un projet ultérieur.

Une fois connus les sites les plus propices à la croissance du peuplier faux-tremble, il sera possible de cartographier ces zones à l'échelle des unités forestières 042-51 et

022-51. C'est donc un outil informatique qui sera utilisé en étroite collaboration avec les partenaires du projet TRIADE pour mettre en place le zonage fonctionnel.

Au préalable il faudra déterminer quels sont les paramètres les plus adéquats, soit :

- 1) ceux qui expliquent le mieux la croissance optimale du peuplier et,
- 2) qui sont facilement accessibles et utilisables par le forestier. En effet, il ne s'agit pas de procéder à une panoplie d'analyses, par exemple pédologiques, mais d'utiliser le matériel disponible maintenant, soit des données provenant des inventaires du MRNFP, complétées par des bases de données d'autres Ministères.

L'enjeu primordial de ce projet de recherche est l'efficacité à long terme de l'exploitation forestière au Québec. L'outil que nous espérons fournir aux forestiers sera donc important pour leur planification forestière, à savoir l'emplacement de leurs plantations futures.

CHAPITRE II

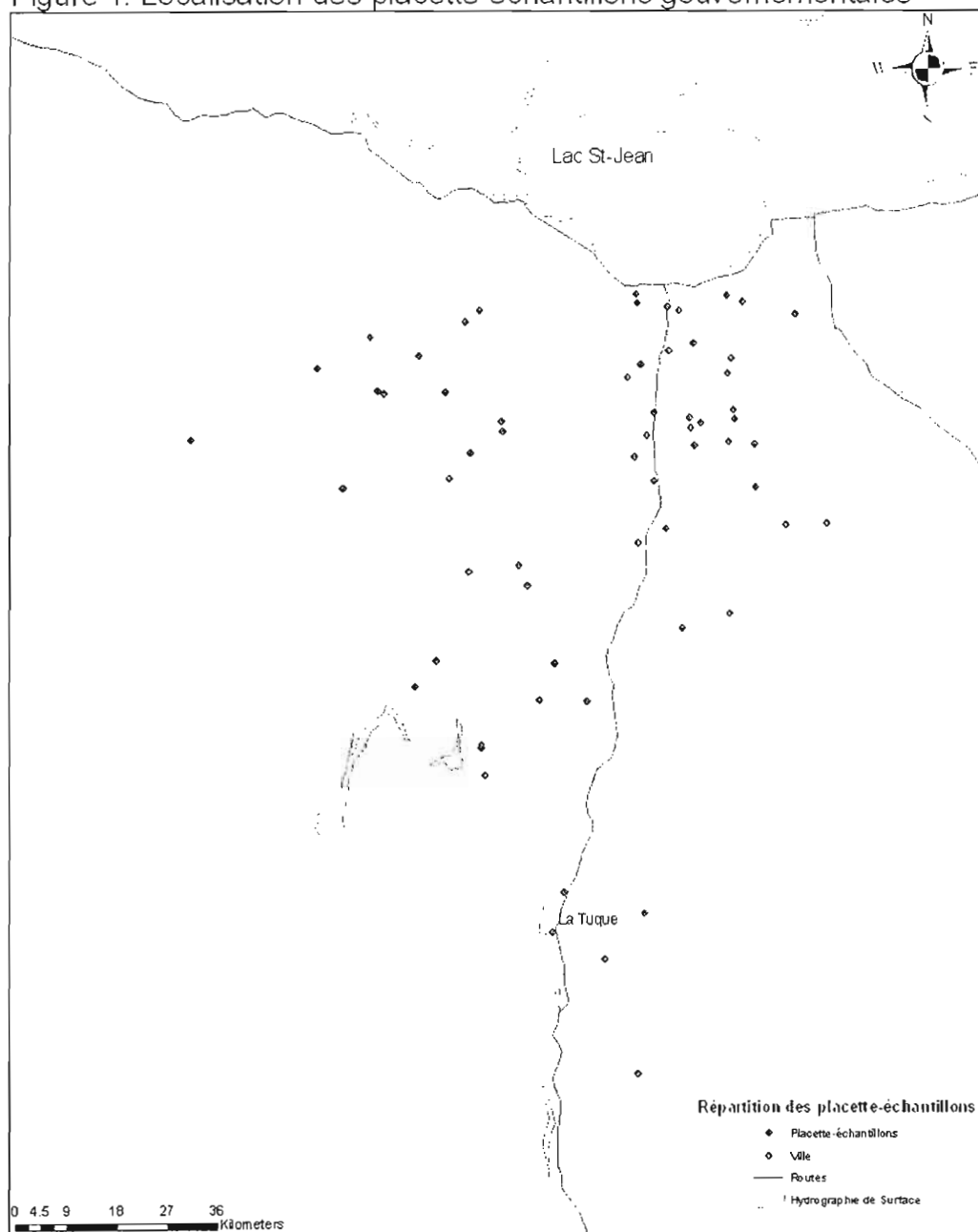
MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Le terrain d'étude

Le terrain d'étude se situe en Haute-Mauricie, dans l'unité d'aménagement forestier (UAF) 042-51 d'une superficie de 1 073 432 d'hectares, dont 669 588 hectares sont destinés à la production forestière et dans l'unité d'aménagement 022-51, qui s'étend sur une superficie de 451 107 hectares, située au nord-ouest de l'UAF 042-51. Ces unités sont situées au sud-ouest du Lac St-Jean, entre les latitudes 45,0502° N et 48,7198° N et les longitudes 71,7729° O et 73,7496° O (Figure 1).

Les grandes caractéristiques environnementales de ce territoire sont relativement homogènes (Tableau 2) (Robitaille et Saucier 1998). Le gradient d'altitude est faible, l'altitude de la région variant entre 330 et 557 mètres. La température moyenne annuelle est de 2,5°C, les précipitations moyennes annuelles varient entre 800 et 1400 mm et les degrés-jours moyens sont d'environ 2000°C. L'assise rocheuse est caractéristique du Bouclier canadien et est constituée de migmatites, de granites, de pegmatites, de granitoïdes à orthopyroxènes (charnockites, mangérites, jotunites, syénites à hypersthènes), d'anorthosites et de gabbros. Des dépôts glaciaires (till mince à épais) et fluvioglaciaires recouvrent le plus souvent ces roches.

Figure 1. Localisation des placette-échantillons gouvernementales



Projection: Lambert Conformal Conic

Par: Jean-François Dupuis

Département de Géographie de l'Université du Québec À Montréal

Janvier 2008

Source: Ministère des Ressources Naturelles Faune et Parc

Tableau 2. Portrait global des unités de paysage

Description / Unités de paysage	29	52	53	60	87	88	89
Superficie (km²)	5166	2169	6314	4842	3737	3331	2362
Topographie							
Altitude moyenne (m)	330	393	367	151	487	557	445
Pente moyenne (%)	15	15	12	1	10	10	8
Amplitude moyenne (m)	122	118	106	13	112	82	77
Dénivellation absolue (m/km)	77	94	78	17	90	68	66
Géologie	cristalline	cristalline métamorphique	cristalline métamorphique	sédimentaire	métamorphique	métamorphique	métamorphique
Formations meubles	till/ till mince	till/ till mince		fluvioglaciaire	till-till mince	idem	idem
Climat							
Température annuelle moyenne (°C)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.50.0	2.5	
Degrés-jours de croissance (°C)	2000-3000	2400-2600	2000-2600	2400	2000	2000	2000
Saison de croissance (jour)	160-180	170	160-170	160-170	160	150-160	160
Indice d'aridité	100-175	100-150	50-125	125-200	50-75	50-75	50-100
Précipitation annuelle moyenne (mm)	900-1400	900	900-1000	800-1000	1000	900-1000	900-1000
Description / Unités de paysage	90	94	95				
Superficie (km²)	2734	2038	1619				
Topographie							
Altitude moyenne (m)	433	341	343				
Pente moyenne (%)	8	9	4				
Amplitude moyenne (m)	83	103	59				
Dénivellation absolue (m/km)	72	83	50				
Géologie	ignée/ métamorphique	cristalline/ ignée/ métamorphique	cristalline/ ignée/ métamorphique				
Formations meubles	till/till mince	till/till mince	till/till mince				
Climat							
Température annuelle moyenne (°C)	2.5	2.5	2.5				
Degrés-jours de croissance (°C)	1800-2000	2000-2400	2000-2400				
Saison de croissance (jour)	140-150	150-170	150-170				
Indice d'aridité	50-75	50-75	50-100				
Précipitation annuelle moyenne (mm)	900-1200	800-1000	800-1000				

Réalisation : Jean-François Dupuis, 2007

Repris de Saucier et Robitaille, 1998

2.2 Le choix du peuplier faux-tremble tremble comme essence indicatrice de qualité du site

Le peuplier hybride est l'espèce envisagée pour la ligniculture intensive. Pour pouvoir mettre sur pied un dispositif expérimental permettant d'identifier les sites qui présentent le meilleur potentiel de croissance de l'essence forestière, il faut une plantation assez grande pour pouvoir établir un gradient de productivité clair. Malheureusement, les plantations de peupliers hybrides au Québec sont majoritairement trop jeunes et surtout trop peu nombreuses, ce qui nous empêche d'identifier les stations les plus propices pour sa croissance optimale. Le peuplier faux-tremble (*populus tremuloides* Michx.) semble adéquat comme essence de remplacement, et ce, pour trois raisons :

- 1- Le peuplier hybride et le peuplier faux-tremble sont tous deux intolérants à l'ombre (Ung et al. 2001)
- 2- Les exigences nutritionnelles du peuplier faux-tremble sont très élevées et se comparent très bien avec celles du peuplier hybride (Bélanger et Paré 2003).
- 3- La croissance du peuplier faux-tremble est fortement affectée par les conditions abiotiques de la station (lumière, drainage, texture), mais n'est pas influencée par la densité du peuplement (Ung et al. 2001).

C'est donc la croissance en hauteur de tiges de peuplier faux-tremble qui a été utilisée comme variable indicatrice de la productivité du site dans le cadre de ce mémoire.

2.3 Les placettes-échantillons

Les données de l'inventaire forestier du Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec (MRNFQ) ont été utilisées pour déterminer l'IQS et les variables de peuplement. Dans cette base, le territoire est divisé en placettes-échantillons ayant une superficie de 0,04 ha: elles sont de forme circulaire et sont espacées de 150 m le long d'un transect d'au moins 1,5 km. La base de données du MRNFQ comporte plus de 15 000 placettes-échantillons. Nous avons sélectionné l'ensemble des placettes dans lesquelles au moins un des arbre-étude était un peuplier afin de maximiser le nombre d'observations. Ainsi, 178 placettes ont été retenues. Habituellement on utilise plusieurs arbres pour déterminer l'IQS d'un site. Cependant, une analyse préliminaire a montré que pour cette essence, la variabilité de la hauteur entre les arbres d'une même placette était minime (écart-type de 10 cm). Ceci n'est pas étonnant puisque le peuplier faux-tremble est une essence de lumière intolérante à l'ombre, dont la croissance débute immédiatement après la perturbation. Tout de même, nous constatons que les parcelles sélectionnées sont bien distribuées et l'IQS couvre un grand éventail variant de 8 à 25 mètres à 50 ans (Tableau 3).

2.4 Identification des indicateurs susceptibles d'expliquer l'IQS du peuplier faux-tremble à l'échelle de l'UAF

Des travaux antérieurs effectués à l'échelle de la placette-échantillon peuvent nous inspirer en ce qui concerne la méthodologie de notre recherche. Ainsi, les travaux de Mckenney et Pedlar (2002), menés en Ontario, visaient une explication plus précise de l'IQS en prenant en compte les caractéristiques physiques de placettes-échantillons de 10 m par 10 m. Les essences témoins de cette étude sont le pin gris (*Pinus*

Tableau 3. Tableau synthèse des données écoforestières, topographiques, climatiques, pédologiques et géologiques des parcelles retenues des UAF 042-51 et 022-51, Haute-Mauricie

nb de placettes-échantillons							
N _{total} = 178							
	\bar{x}	Min.	Max.	Écart-type (S)	Mode	Unité	Source
<u>Ecoforestières</u>							
IQS	17.08	8	25	3.45	17	M à 50 ans	*MRNQ
% de conifères	23.37	0	94	21.54	0	%	*MRNQ
<u>Topographiques</u>							
Altitude	379.55	222	570	79.78	308	m	www.GeoBase.com
Drainage	30	20	40	-----	----	0-7	*MRNQ
<u>Climatiques</u>							
Degré jour	1336.06	1043	1570	89.33	1401	degré C°	BioSIM 8.4.0
Précipitation utile	331.12	302	373	14.21	315	mm/an	BioSIM 8.4.0
Radiation solaire	3201.33	2888	3403	86.76	3232	Mj/m²	BioSIM 8.4.0
<u>Pédologiques / géochimiques</u>							
Ca	13.05	8.17	42.84	4.18	11.96	meq/100gr	*MRNQ
K	8.39	2.12	15.34	4.48	13.21	meq/100gr	*MRNQ
Mg	11.51	3.6	24.57	5.29	16.15	meq/100gr	*MRNQ
Sable	55.96	0	90	23.09	66	%	*MRNQ
Argile	13.16	0	50	7.37	12	%	*MRNQ
Limon	25.25	0	61	16.44	22	%	*MRNQ

Réalisation : Jean-François Dupuis, 2007

Ministère des Ressources Naturelles du Québec – Inventaires forestiers

banksiana Lamb.) et l'épinette noire (*Picea mariana* Mill.), qui sont tous deux des essences commerciales de la forêt boréale canadienne. Les caractéristiques physiques retenues sont le climat, les caractéristiques du sol et la topographie. Le fait de considérer chaque site individuellement et non par région offre une précision accrue. L'IQS demeure tout de même l'indice privilégié pour cette modélisation. Une fois l'IQS calculé dans chacune des placettes-échantillons, la moyenne des trois plus forts était conservée pour réduire le biais des arbres morts ou endommagés. Le modèle a pris en compte les différentes variables physiques et a simulé le potentiel de productivité forestière. Comparativement aux études citées précédemment, les résultats de Mckenney et Pedlar (2002) ont été exprimés différemment. C'est une approche par arbre de régression ou classification (*tree-based regression model*) et les résultats ont été représentés sous forme d'arbre ou d'algorithme de décision. L'explication des résultats est intéressante, mais comporte plusieurs lacunes (Mckenney et Pedlar 2002). En effet, le principe de l'algorithme de décision est représenté par un graphique arborescent. Les lacunes de ce type de graphique sont que les divisions sont très arbitraires et peuvent ne pas représenter la réalité la plupart du temps. Le cas du pin gris, à la première division de l'arbre, propose un sol minéral de plus de 40,5 cm et de moins de 40,5 cm (Mckenney et Pedlar 2002). Cette première division indique donc une démarcation à cette épaisseur de sol minéral. Concrètement, selon cette étude, le sol minéral peut être entre 30 et 50 cm pour la croissance optimale du pin gris (Mckenney et Pedlar 2002). Il s'agit ici d'une division arbitraire qui divise également la profondeur minimale et maximale du sol. Les auteurs rappellent que ces divisions sont en fonction des données disponibles, elles sont faites ainsi afin de donner les résultats optimaux, mais il se peut que d'autres variables puissent être aussi employées comme variables de départ dans l'arbre de régression (*initial split*).

D'autre part, les résultats pour l'épinette noire sont moins concluants que pour le pin gris. Néanmoins, plusieurs variables ressortent clairement de cette analyse. La première division est au niveau du sol organique et conséquemment, la deuxième division est reliée au climat, car la diffusion de la chaleur sera facilitée par l'épaisseur du sol organique et des dépôts en place (Mckenney et Pedlar 2002). Le climat et les précipitations jouent un rôle important dans la productivité de l'épinette noire. Les faibles températures et précipitations favorisent un rendement faible et la hausse de la température et des précipitations augmente le rendement (Mckenney et Pedlar 2002).

Somme toute, Mckenney et Pedlar (2002) présentent une méthode qui facilite une gestion responsable et efficace de la forêt en utilisant un algorithme qui permet d'identifier le potentiel des sites.

Castellon et Sieving (2006) présentent une technique de modélisation pouvant s'adapter parfaitement à l'échelle à laquelle nous travaillerons. Ils proposent un modèle du type arborescent. Ils se servent du logiciel DTREG (Sherrod 2003), que nous envisageons utiliser pour notre modélisation.

L'objectif central pour ces chercheurs était de trouver les bonnes variables pouvant prédire la localisation du Chucao Tapaculo (*Scelorchilus rubecula*). Comme ce type d'oiseau recherche certains types d'habitats bien précis, chercher à comprendre pourquoi il réussit à s'y installer se rapproche de la croissance optimale du peuplier faux-tremble. S'appliquant à une base de données complexe et homogène, la méthode arborescente présente des avantages intéressants tels que l'absence de colinéarité, l'analyse de chaque nœud séparément, ce qui minimise l'erreur introduite dans le modèle (Castellon et Sieving 2006). Au même titre que notre recherche, Castellon et Sieving ont dû adapter leur base de données afin de couvrir leur terrain d'étude le

plus adéquatement possible. Seulement, il existe une différence. A l'inverse de leur jeu de données, nous proposons beaucoup plus de données afin de prédire la croissance du peuplier, ce qui présente une difficulté supérieure..

En ce qui concerne leurs résultats, Castellon et Sieving réussissent à atteindre un taux de réussite très probant, le premier modèle classe adéquatement les sites avec 82% (Chiloé) d'efficacité et le deuxième avec 88,71% (Osorno). Par contre, selon cette étude, chaque modèle réussit à bien classer seulement une fraction des sites en fonction de leur superficie. Le modèle Chiloé réussit à bien classer les petits sites et à l'inverse du modèle de l'Osorno. L'avantage que nous avons par rapport à cette étude est que nos placettes-échantillons conservent la même superficie sur l'ensemble du territoire. Bref, cette étude démontre les bienfaits de la modélisation via l'arbre de classification et présente tous les avantages nécessaires à notre type de recherche.

2.5 Acquisition des données

Notre modèle doit être développé à partir d'informations disponibles. Pour cette étude, nous nous sommes servis de la base de données de l'inventaire forestier du Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec. Les données ont été recueillies au cours de différentes campagnes de terrain depuis 2000 (Doyon et al. 2004) et certains compléments comme les dépôts de surface, identifiés à partir de photo-interprétation, s'y sont ajoutés. La placette-échantillon est en fait une unité de territoire circulaire possédant un peu plus de 11.28 mètres de rayon, soit 400 mètres carrés (Dumont 2005). Nous avons sélectionné 178 placettes et nous n'avons conservé que les placettes dont au moins un des arbre-étude était un peuplier.

Néanmoins, ces parcelles sont bien distribuées et l'IQS (Tableau 3) couvre un grand éventail variant de 8 à 25 mètres à 50 ans.

Les informations disponibles provenant de la placette sont les essences retrouvées, leur santé, le degré de défoliation ainsi que les défauts des arbres (Ministère des Ressources Naturelles et Faune du Québec 2007). L'âge de trois arbres dominants de la placette-échantillon est mesuré, la hauteur de ces trois arbres ainsi que les caractéristiques de la végétation du sous-bois et finalement, la pédologie sont notés (Ministère des Ressources Naturelles et Faune du Québec 2007).

Initialement, pour bâtir le modèle de prédiction, nous devons identifier les nombreux indicateurs de croissance. Ces indicateurs sont les variables indépendantes de l'IQS. Malheureusement, toutes les données nécessaires à la mise sur pied du modèle ne figurent pas intégralement dans une seule et même base de données du Ministère. C'est pourquoi la mise en commun de plusieurs jeux de données a dû être faite. Du point de vue méthodologique, l'utilisation de logiciels de systèmes d'informations géographiques est nécessaire. La combinaison des jeux de données est le point central de la base de données finale et requiert une expertise dans ce domaine. Comme le but est de permettre aux dirigeants forestiers de se servir d'une seule et unique base, le fait de bâtir en un seul fichier les données permettant de modéliser et de prédire la croissance du peuplier faux-tremble était la priorité.

2.6 Description des variables retenues

Nous avons utilisé des données de différentes sources pour déterminer les variables explicatives de l'IQS. Le premier ensemble de données (Tableau 3) est celui des

données écoforestières. La deuxième variable est la surface terrière relative qui est en fait l'aire couverte par une espèce par rapport à l'aire couverte par toutes les espèces. Donc, à l'intérieur d'une même placette, plusieurs essences s'y retrouvent et le résultat est donné sous forme de pourcentage. Nous représentons cette variable sous forme de % de conifères dans la placette-échantillon. Ces données sont tirées de la base de données de l'inventaire forestier du MRNFQ et les calculs de proportion ont été effectués pour déterminer le pourcentage de conifères.

Le deuxième ensemble de données constitue les variables topographiques qui sont extraites d'un modèle numérique d'altitude (MNA) provenant de GeoBase. Ce dernier est calculé à tous les trois arc-secondes, ce qui donne une résolution de 100 mètres par 100 mètres. De ce MNA sont générées les valeurs d'altitude, d'orientation (360°) ainsi que d'inclinaison (en pourcentage). Les variables de l'orientation et de l'inclinaison générées par le MNA ne se sont pas révélées significatives et ont été éliminées. Le drainage a aussi été ajouté au nombre de variable indépendantes. La base de données comprenant cette information est celle de l'inventaire forestier du Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec (MRNFQ). Le drainage est expliqué sur une échelle allant de 1 à 7 (excessif à très mal drainé). Basé sur « Le point d'observation écologique, normes et techniques » (Saucier et al., 1994), l'information a été recueillie par le Ministère des Ressources Naturelles via des campagnes de terrain.

Nous avons calculé les variables climatiques en utilisant le logiciel BioSIM 8.4.0 (Régnière et St-Amant 2006). Nous avons généré l'information nécessaire sur le climat de notre territoire. Les degrés jours, les précipitations utiles, la radiation solaire seront ainsi ajoutés à notre base de données. BioSIM a été créé afin de simuler le

développement des insectes à une échelle régionale basé sur des données climatiques. Le logiciel combine les sources de données climatiques géo-référencées (120 stations accumulant des données allant de 1965 à 1998) au site spécifié (terrain d'étude). Donc, les sources de données climatiques sélectionnées sont ajustées à la bonne latitude, altitude, pente et orientation. BioSIM devient un avantage important car il combine des données spatiales à des données climatiques dans un petit jeu de données.

En ce qui concerne les degrés jours, nous avons établi le seuil à 5°C y^{-1} . Il s'agit de la sommation de la température journalière moyenne au-dessus de 5°C y^{-1} . Cette variable est couramment utilisée pour évaluer la croissance et le développement des végétaux durant la saison de croissance car elle exclut les périodes où la végétation n'est pas active. Idéalement, la température optimale varie entre $15^{\circ}\text{C y}^{-1}$ et $25^{\circ}\text{C y}^{-1}$ et la photosynthèse ralentit jusqu'à 5°C y^{-1} (Boily 2008). Elle servira aussi à éviter de baser des calculs sur la période de dormance de l'essence car la température de référence est fixée à 5°C y^{-1} . La répartition étant inégale sur l'ensemble de notre territoire, les fonds de vallées représentent les zones où les degrés jours sont le plus élevés et inversement, les plateaux surélevés de la région ont beaucoup moins d'accumulation de degrés jours. Ceci représente un indice majeur quant à la localisation des futures zones optimales de productivité. Toujours du point de vue climatique, les précipitations utiles, sous forme liquide, ont une influence marquée sur la croissance du peuplier faux-tremble. Les données de radiation solaire réelle ont été générées par le modèle adapté de Richardson (1981) et de Wilks (1999) à partir du logiciel BioSIM 8.4.0 (Régnière et St-Amant 2006). La radiation solaire est prise en compte en excluant le couvert forestier, donc elle est calculée de façon totale.

Le dernier ensemble de données est celui des caractéristiques pédologiques et lithologiques, plus particulièrement de la géochimie ainsi que de la composition des sédiments fins. La valeur moyenne par type de lithologie des concentrations de trois cations basiques (K, Ca et Mg) extraits par attaque à l'acide (HNO_3 10% et HCl chaud pendant une heure) dans la fraction fine ($<177 \mu\text{m}$ tamisé à sec) d'échantillons de sédiments de lacs est utilisée (Paré et Baumier 2005). La géochimie de la fraction fine des sédiments reflète la composition de cette fraction à l'échelle du bassin versant. C'est pourquoi cette approche est utilisée en prospection minière (voir Base Sigéom, Mines Québec). Dans le territoire à l'étude, peu de données géochimiques sont disponibles. Cependant, les travaux de Bolduc (1992) démontrent qu'il y a dans cette région une correspondance très étroite entre la géochimie des dépôts et celles de la lithologie sous-jacente. Il apparaît donc pertinent de se baser sur la composition de la roche sous-jacente pour établir une approximation de la qualité géochimique du dépôt. Étant donnée le manque de données sur la géochimie des sédiments dans le territoire à l'étude, les informations sur la qualité géochimique des dépôts sur des lithologies semblables se trouvant à l'extérieur de la zone d'étude ont été utilisées. Il est donc pertinent de se baser sur le type de dépôts, même s'il n'est pas inclus directement dans le territoire d'étude, pour attribuer une valeur en éléments chimiques. Le fait de prendre des échantillons de lac fera en sorte de représenter, suite à l'écoulement, la quantité d'éléments disponibles de la région à l'étude.

2.7 Calcul de l'Indice de Qualité des Stations

Nous avons complété la base de données du MRNQ en y ajoutant un indice de qualité des stations (IQS) (hauteur estimée à 50 ans d'âge) du peuplier faux-tremble. L'IQS est calculé en fonction de la hauteur du peuplier faux-tremble ainsi qu'avec son âge

corrigé à 1 mètre. Nous avons utilisé les coefficients (b_1 ; b_2 ; b_3 ; b_4 ; b_5) proposés par Pothier et Savard (1998) pour le calcul de l'IQS (Tableau 1).

L'IQS est un indice de croissance qui, appliqué au peuplier faux-tremble, n'est pas ou peu affecté par la densité du peuplement et qui devrait refléter la productivité potentielle du site (Ung et al. 2001). Hamel et al. (2004) ont montré que, dans la forêt boréale et tempérée nordique québécoise, l'IQS demeure un bon indicateur de productivité forestière si les degrés-jours et le type de matériau parental sont ajoutés en tant que variables indépendantes: avec cet ajout, 40% de la variabilité de l'IQS était expliquée. Encore mieux, en ajoutant certaines caractéristiques chimiques et biologiques du sol, l'explication du modèle atteignait 60%.

2.8 Traitements statistiques des données et mode d'élaboration du modèle

Généralement, les chercheurs ayant déjà travaillé sur ce type de projet préconisent l'approche du type statistique simple, soit les corrélations simples et multiples. Nous avons voulu pousser plus loin l'analyse statistique. Ainsi, des corrélations entre les variables de sites et l'IQS, suivies d'une analyse en composante principale (ACP) ont été utilisées pour comprendre la structure de la variabilité des données et pour réduire la redondance et le nombre de variables dans les modèles multivariés de prédiction de l'IQS. Des régressions multiples ont été développées avec la méthode « pas à pas ». Le seuil de probabilités significatives a été posé à 0,05% et l'ordre dans lequel les variables ont été entrées dans le modèle est mixte. Cette méthode permet donc de réduire le nombre de variables introduites dans le modèle et de le conserver le plus simple possible.

L'arbre de classification a été fait de façon à pouvoir déterminer des classes d'IQS. Ces classes représentent en fait les groupes d'IQS susceptibles de segmenter clairement la croissance du peuplier, allant d'une moins bonne croissance, soit de 0 mètre à 17 mètres, à une excellente croissance, soit 20 mètres et plus. Il s'agissait donc de pouvoir contrôler directement où la croissance se faisait réguler par les facteurs écologiques identifiés.

Cette méthode permet d'utiliser des variables discrètes autant que continues et ne nécessite pas de distribution particulière des données. Initialement, ce type de modélisation préconise l'introduction préalable d'un biais potentiel en y introduisant un nombre de variables importantes susceptibles de biaiser les résultats (Verbyla et Fisher 1988). Donc, pour pallier à ce problème statistique, la technique employée pour la création de l'arbre de classification utilise la méthode de la validation croisée. Ceci consiste à retirer 10% des observations au moment de la création du premier arbre de classification. Ce 10% retiré devient donc indépendant du modèle et ensuite l'erreur de classification est calculée. Ensuite, un autre arbre de classification est créé et cette fois, avec un autre 10% des observations retirées. Il a été démontré par Sherrod (2003) que le gain de précision est minimal lorsque 10 validations croisées sont faites. Le modèle a donc été calculé avec 10 validations croisées. Une fois les 10 arbres de classification effectués, le taux d'erreur moyen (*Root Mean Square Error* ou RMSE) est calculé pour ensuite procéder à la séparation des nœuds de l'arbre. Il s'agit en fait de minimiser l'erreur tout au long du cheminement pour ainsi déterminer le bon nombre de nœuds avec le moins d'erreur. Cette méthode permet donc de réduire au maximum les biais prédictifs (Breiman et al. 1984).

Comme le suggèrent Lopez-Moreno et Nogués-Bravo (2006), plus l'arbre de classification est simplifié, plus il risque d'être précis. Le nombre de nœuds est

déterminé à l'aide de l'indice d'exactitude qui est le « Root Mean Square Error » (RMSE). Lorsque que le nombre de niveaux augmente, le RMSE varie et influence les divisions de l'arbre ainsi que les variables à être incluses. Lorsque le RMSE devient stable, le modèle a atteint son plein potentiel. Le calcul du RMSE a donc été utilisé afin de déterminer les facteurs influençant croissance du peuplier faux-tremble.

Toutes ces analyses statistiques ont été faites à l'aide du logiciel Jump In 5.1 et 7, interface de SAS et SPSS 14.0.

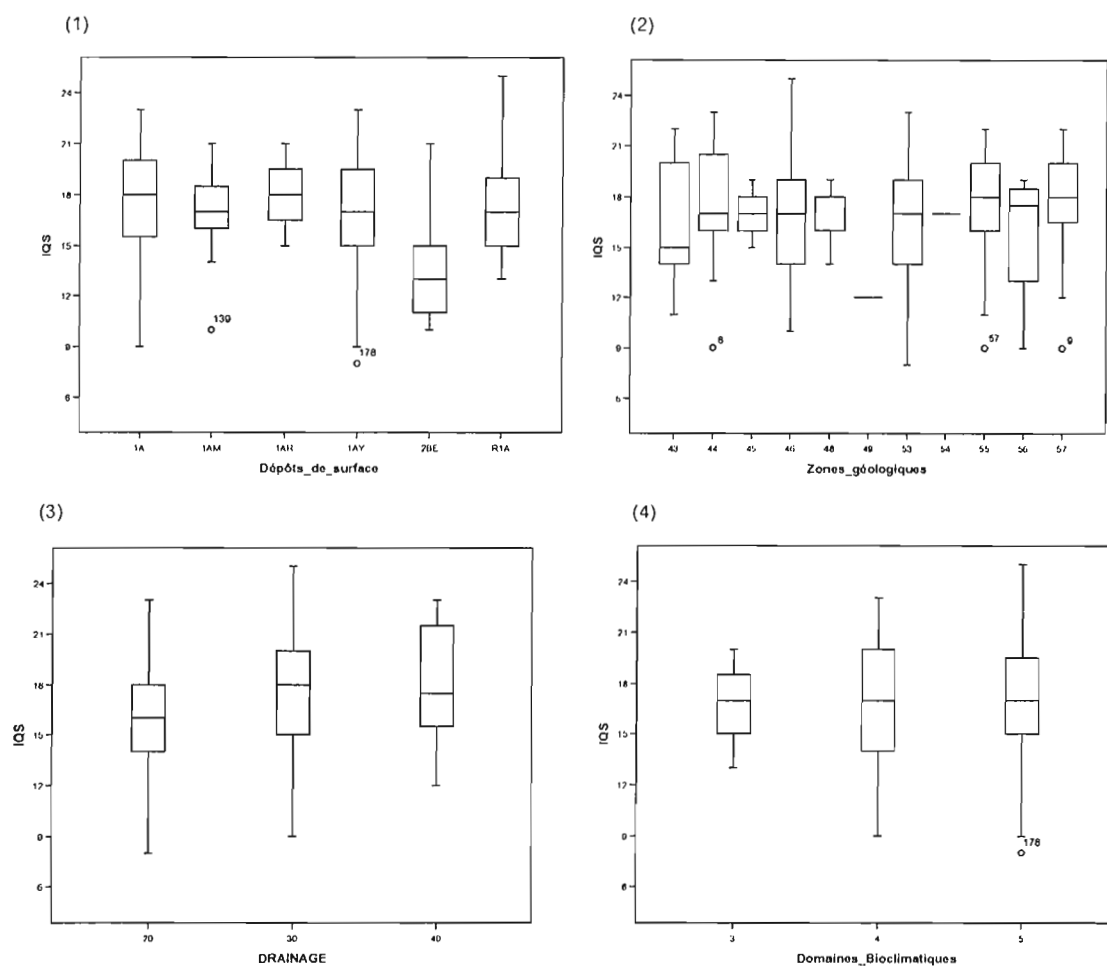
CHAPITRE III

RÉSULTATS

3.1 Généralités

Les zones à granites ou granitoïdes présentent un IQS plus fort mais la variabilité de l'IQS est forte dans l'ensemble des lithologies présentes, à l'exception des gneiss charnockitiques, soit la lithologie 45 (Figure 2). Les tills épais, moyens, minces et minces sur roc présentent une forte variabilité mais les IQS y sont nettement plus forts que sur les dépôts fluvioglaciaires (2BE). Les sites à drainage modéré et imparfait offrent une meilleure croissance que ceux à bon drainage grâce à l'effet de l'accumulation d'eau vers les bas de pente (*seepage*), mais la différence demeure toutefois peu marquée. En effet, la variabilité de l'IQS demeure très importante au sein des trois classes de drainage. Finalement, les domaines bioclimatiques les plus productifs sont l'érablière à bouleau jaune, la sapinière à bouleau jaune et la sapinière à bouleau blanc, qui se situe plus au nord, mais la variabilité de l'IQS est importante.

Figure 2. Moyenne, écart-type, minimum et maximum de l'IQS par lithologie, classe de drainage, dépôts de surface et domaines bioclimatiques



- (1) Dépôts de surface: 1A- 1AM-1AY-R1A: Till mince sur roc à till épais; 2BE: Épandages fluvioglaciaires
 (2) Zones géologiques : Lithologie #: 43: Gneiss gris à quartz; 44: Gneiss granitique et granodioritique; 45: Gneiss Charnockitique; 46: Migmatite; 48: Paragneiss, quartzite et amphibolite; 49: Calco-silicate, schiste, marbre, quartzite et dolomie; 53: Anorthosite et gabbro; 54: Gabbro, pyroxénite, troctolite et amphibolite; 55: Granitoïde à orthopyroxène; 56: Syénite, monzonite, granodiorite et diorite; 57: Granite et pegmatite
 (3) Drainage : classe 20 : Bon; classe 30 : Modéré; classe 40 : Imparfait
 (4) Domaines bioclimatiques : 3: érablière à bouleau jaune; 4: Sapinière à bouleau jaune; 5: Sapinière à bouleau blanc

3.2 Analyse des corrélations simples

Seuls le drainage et le calcium sont corrélés significativement à l'IQS au seuil de probabilité fixé à 5%, quoique très faiblement (Tableau 4).

Tableau 4. Corrélations simples (IQS vs variables impliquées)

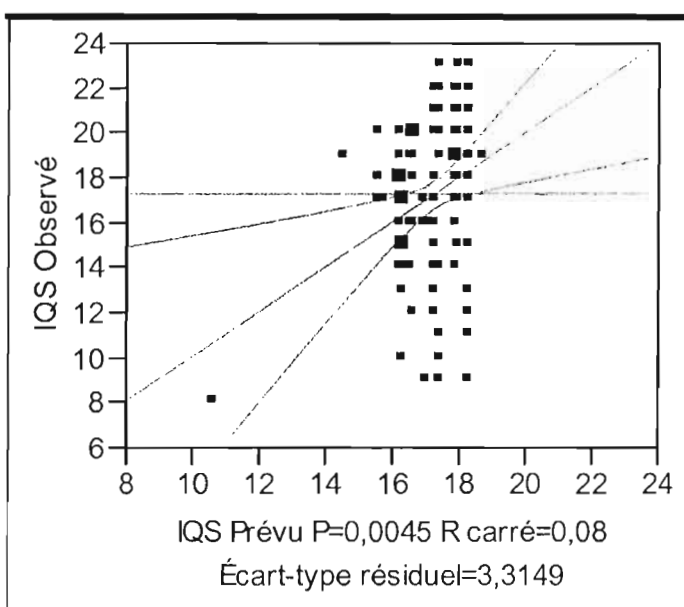
$n_{\text{total}} = 125$	r^2	f ratio (Prob > F)
Drainage	0,038	0,0283
Potassium (K)	0,0004	0,0811
Magnésium (Mg)	0,0053	0,4205
Calcium (Ca)	0,037	0,0305
Élévation	0,004	0,4598
Degrés jours	0,0009	0,7337
Précipitations utiles	0,0003	0,8293
Radiations solaires	0,019	0,1170
Sable	0,023	0,0901
Argile	0,008	0,3130
Limon	0,001	0,6388
% de Conifères	0,018	0,1280

JPM 5.1 (SAS)

3.3 Régressions linéaires multiples

Il y a peu de relation entre l'IQS et les variables degrés-jours, pourcentage de conifères, potassium, magnésium, élévation, précipitations utiles, radiation solaire ainsi que le pourcentage de sable, d'argile et de limon du sol (Figure 3). Seuls le drainage et le calcium ont une probabilité significative une fois combinées.

Figure 3. Analyse Pas à Pas : graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues (12 variables)



Résumé de l'ajustement

R carré	0,084734
R carré ajusté	0,06973
Écart-type résiduel	3,31494
Moyenne de la réponse	17,272
Observations (ou sommes pondérées)	125
Prob > F	0,0045

Calcium et drainage

Ca	$r^2 = 0.0847$
	Prob > F = 0.0271
Drainage	$r^2 = 0.0472$
	Prob > F = 0.0149

Formule de prédiction : $19,275 + -0,844 * \text{Drainage} + -0,184 * \text{Ca}$

Réalisation : Jean-François Dupuis, 2007
JMP 7.0 (SAS)

3.4 Relations entre les variables

L'analyse des corrélations multiples entre nos variables nous permet de réduire le nombre de variables à inclure dans le modèle. Ceci nous révèle que certaines variables dont nous disposons seront en fait exclues du modèle car elles sont hautement corrélées avec une autre variable. Les probabilités de signification de la relation sont donc toutes maintenues en-dessous du seuil fixé à 5% (Tableau 5).

Tableau 5. Corrélations des différentes variables climatiques, topographiques, pédologiques et écoforestières

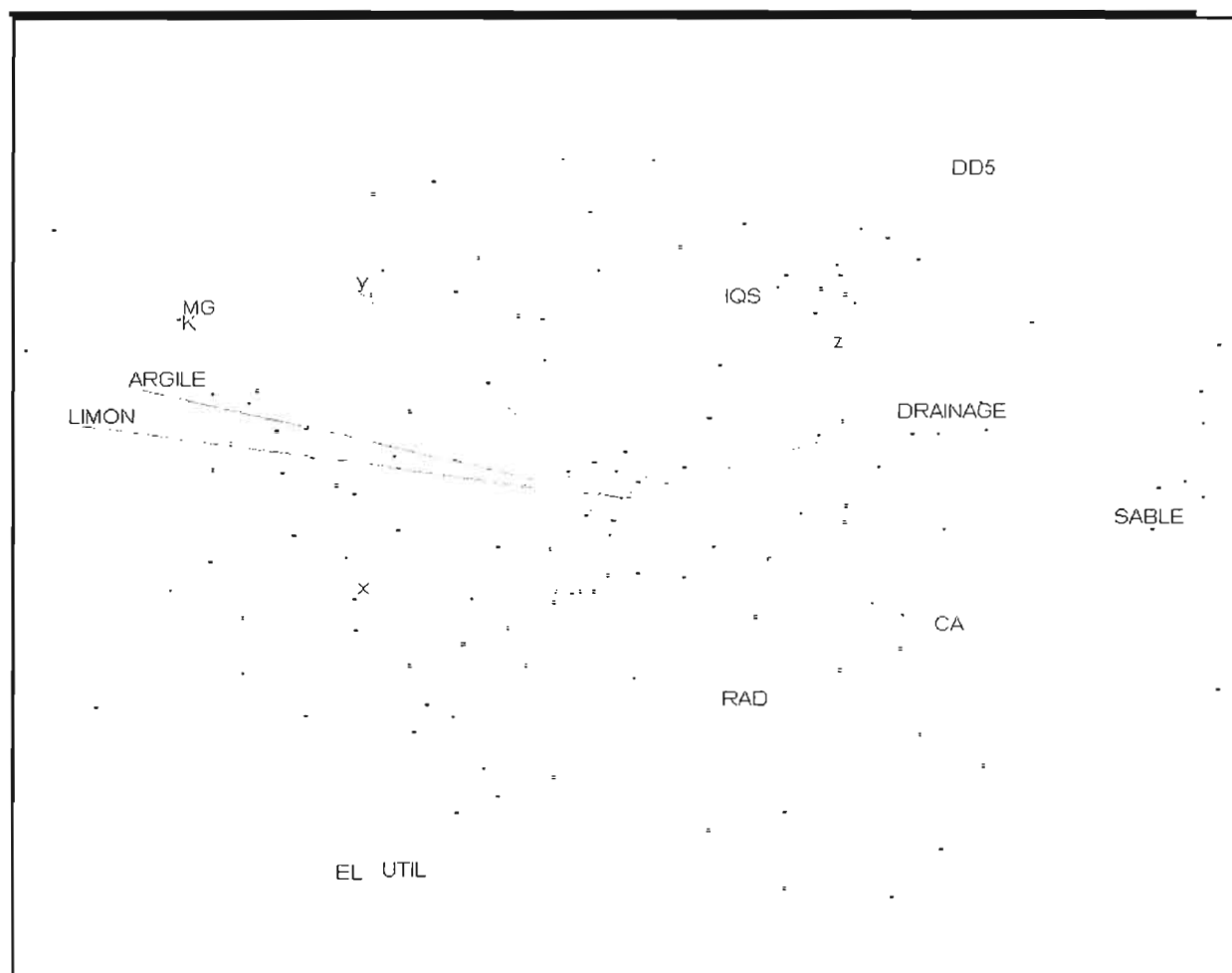
Effectif : n=125	Variables corrélées	r^2	prob> t	Unités
<i><u>Variables climatiques</u></i>				
Degrés-jour (degré C°, Seuil à 5 C°)	Elévation (m)	-0,889	Prob > F 0,0000	m
	Précipitations utiles (mm)	-0,6124	Prob > F 0,0000	mm
<i><u>Variables pédologiques / géochimiques</u></i>				
Ca	K	-0,4984	Prob > F 0,0000	mmol/100g
	Mg	-0,5123	Prob > F 0,0000	mmol/100g
Mg	K	0,7882	Prob > F 0,0000	mmol/100g
Sable	Limon	-0,4366	Prob > F 0,0000	%
Limon	Argile	0,4377	Prob > F 0,0000	%
Drainage	Mg	-0,2402	Prob > F 0,0070	---

JMP 5.1 (SAS)

L'ACP confirme ces résultats de manière graphique, la force des corrélations étant illustrée par la longueur des vecteurs. En effet, la corrélation entre les degrés-jours et les précipitations utiles ainsi que l'élévation est très forte, alors que le calcium est corrélé négativement de façon très claire avec le magnésium et le potassium (Figure

4). Nous pouvons donc réduire de 12 à 4 le nombre de variables tout en conservant 55,65% de l'explication de la variance (Tableau 6).

Figure 4. Analyse en Composante Principales (ACP) sur l'ensemble des données



JMP 5.1 (SAS)

Tableau 6. Résultats de l'ACP

	Axe 1	Axe 2	Axe 3
Valeur propre	3.1257	2.0917	1.4603
Percent	26.0478	17.4305	12.1689
Cum Percent	26.0478	43.4783	55.6472
Vecteur propre			
IQS	-0.00411	0.11129	0.35615
DRAINAGE	-0.16703	-0.05347	0.15990
K	0.36327	0.32477	0.26098
CA	-0.32499	-0.22011	-0.31242
MG	0.36989	0.33552	0.28955
EL	0.47186	-0.28940	-0.16490
DD5	-0.44889	0.20973	0.14892
UTIL	0.39073	-0.29282	-0.22789
RAD	0.09883	-0.27385	-0.04730
SABLE	-0.00869	-0.33238	0.46816
ARGILE	0.10343	0.38434	-0.23579
LIMON	0.01798	0.41424	-0.46874

Réalisation; Jean-François Dupuis, 2007

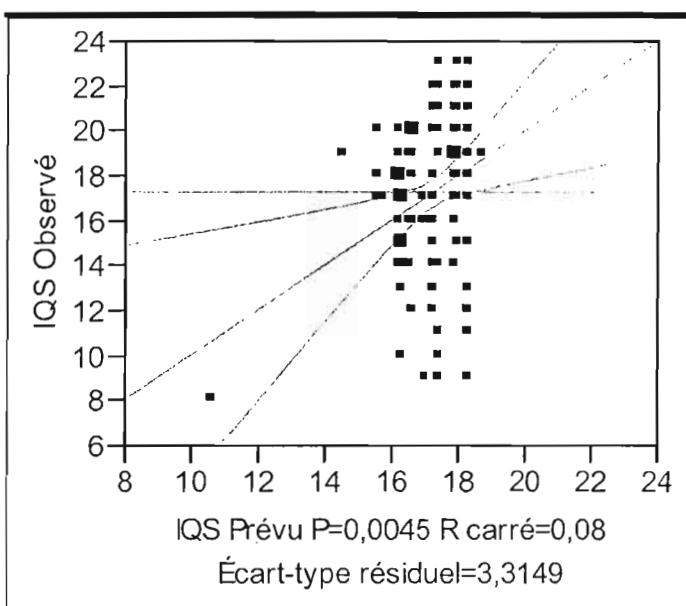
JMP 5.1 (SAS)

L'analyse des corrélations significatives entre les variables indique qu'en ce qui a trait aux variables climatiques, la variable des degrés-jours peut représenter d'un même coup l'altitude ainsi que les précipitations utiles (Tableau 5). Malheureusement, les variables de l'orientation et de l'inclinaison générées par le MNA ne se sont pas révélées significatives. Pour les variables géochimiques, le calcium est inversement corrélé au potassium et au magnésium. De plus, le sable et le drainage sont liés au calcium alors que les teneurs en particules fines (argiles et limons) s'opposent à ces valeurs donc, elles seront corrélées au potassium et au

magnésium. Les variables qui entreront dans la modélisation seront les degrés jours, le calcium, le sable ainsi que le drainage (Figure 5).

Les régressions linéaires multiples «Pas à Pas» avec seulement ces quatre variables indiquent que seuls le drainage et le calcium se démarquent (Figure 5). Les résultats sont donc identiques au test effectué avec les 12 variables (Tableau 4).

Figure 5. Analyse Pas à Pas : graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues (4 variables)



Résumé de l'ajustement

R carré	0,084734
R carré ajusté	0,06973
Écart-type résiduel	3,31494
Moyenne de la réponse	17,272
Observations (ou sommes pondérées)	125
Prob > F	0,0045

Calcium et drainage

Ca	$r^2 = 0,0847$
	Prob > F = 0,0271
Drainage	$r^2 = 0,0472$
	Prob > F = 0,0149

Formule de prédiction : $19,275 + -0,844 * \text{Drainage} + -0,184 * \text{Ca}$

Réalisation : Jean-François Dupuis, 2007
JMP 7.0 (SAS)

3.5 Arbre de classification

Ce traitement statistique diffère nettement des deux méthodes précédentes. Ce type de modélisation se sert soit de classes d'IQS ou de l'IQS brut. L'IQS brut est en fait chaque valeur prise séparément et l'IQS regroupé en classe. Le Tableau 7 fait la synthèse des essais effectués à l'aide du logiciel DTREG 6.0 (Sherrod, 2003).

Tableau 7. Synthèse de la modélisation arborescente

Données /	Effectif	% de mauvaise classification moyen	Algorithme	Validation
croisée				
<u>Classes</u>				
A-B-C	125	49,7	Gini	10
A-B	125	31,84	Gini	10
[0-17]	57	41.8	Gini	10
[18 et plus]	68	39.7	Gini	10
<u>Brut</u>				
Global	125	27	Gini	10
[0-17]	57	40,2	Gini	10
[18 et plus]	68	48.22	Gini	10
<u>Variables utilisées</u>				
Degrés jours, sable, calcium, % conifères, radiation solaire, élévation, drainage				
Classes: A-B-C : [0-14]; [15-19]; [20 et plus[
A-B : [0-17]; [18 et plus[
Réalisation : Jean-François Dupuis, 2007				
DTREG 6.0				

Ceci démontre la force de classification des différents modèles effectués à raison de trois classes par modèle. Le pourcentage de mauvaises classifications ne descend pas sous la barre des 27%, ce qui représente une marge de manœuvre trop grande pour prédire l'IQS. L'ensemble des modèles effectués représente un faible taux de bonnes classifications, que ce soit à partir des classes d'IQS ou de l'IQS brut. Le même algorithme ainsi que le nombre de validations croisées furent employées pour ne pas biaiser l'interprétation.

3.6 Lithologie et éléments nutritifs

Nous avons voulu vérifier si le potentiel de croissance pouvait s'expliquer par une lithologie particulière. Pour ce faire, nous avons comparé les rapports des bases extractibles (Ca, Mg, K) des sédiments de lacs (Tableau 8) avec les rapports optimaux de ces éléments nutritifs contenus dans le feuillage (Tableau 9).

Tableau 8. Moyenne et écart-type des éléments nutritifs sur l'ensemble du territoire

Lithologie	Ca	\bar{v}	S	Mg	\bar{v}	S	K	\bar{v}	S	unités
43		14,8	12,6		6,3	6,8		3,7	6,3	mmol/100g
44		17,2	16,8		7,5	10,7		3,6	3,9	idem
45		21,5	18,3		4,6	5,1		3,5	8,2	idem
46		19,5	19		4,8	5,8		2,7	2,7	idem
48		18,2	25,1		5,6	9,8		4,4	5,1	idem
49		43,7	41,3		11,3	17,2		9,7	10,3	idem
53		15,9	12,9		3,6	3,8		2,1	1,8	idem
54		17,5	17,2		5	6		3,9	4,1	idem
55		15,7	12,4		4,2	3,8		2	1,8	idem
56		17,8	14,6		6,1	10,4		3,5	4,2	idem
57		18,6	14,2		4,9	6,1		3,1	3	idem

Réalisation : Jean-François Dupuis, 2007
Géologie Québec (SIGEOM)

Tableau 9. Rapports des éléments nutritifs de la roche/lithologie en comparaison avec les concentrations optimales du feuillage du peuplier hybride

<u>UAF 042-51/022-51</u>						
<i>Lithologie</i>	nb échantillons	K/Ca	Ca/Mg	Mg/Ca	K+Mg/Ca	unités
43	7089	0,48	3,94	0,25	0,74	g/100g
44	3537	0,41	3,84	0,26	0,67	idem
45	2939	0,31	7,75	0,13	0,44	idem
46	3671	0,27	6,8	0,15	0,42	idem
48	8637	0,47	5,42	0,18	0,65	idem
49	2325	0,43	6,46	0,15	0,59	idem
53	3315	0,26	7,34	0,14	0,4	idem
54	1889	0,44	5,84	0,17	0,61	idem
55	2934	0,24	6,23	0,16	0,4	idem
56	1680	0,38	4,89	0,2	0,59	idem
57	1896	0,33	6,33	0,16	0,49	idem
<u>Auteurs</u>						
Ménétier et Vallée 1977	---	2,29	5	0,2	2,49	g/100g
Leech et Kim 1981	---	2,18	4,65	0,21	2,4	idem
Ericsson et al. 1992	---	0,69	6,67	0,15	0,84	idem
Idem	---	0,95	5,68	0,28	1,13	idem
Bonneau 1998	---	0,94	9,41	0,11	1,04	idem
Idem	---	2	5	0,2	2,2	idem
Hanson 1994	---	2,4	---	---	---	idem

Réalisation : Jean-François Dupuis, 2007

Repris de Bernier, 1984

En comparant les rapports des éléments nutritifs retrouvés sur notre territoire avec ceux déterminés par d'autres chercheurs (Bernier 1984), nous pouvons identifier les lithologies qui offrent une concentration optimale d'éléments chimiques favorables à la croissance des arbres. En examinant les rapports entre le calcium et le magnésium, nous constatons que les lithologies 43 (Gneiss gris à quartz) et 44 (Gneiss granitique et granodioritique) sont en-dessous du seuil optimal pour le calcium. Ces lithologies n'offrent pas un ratio nécessaire de calcium afin de permettre une croissance idéale au

peuplier faux-tremble. Néanmoins, aucun débalancement majeur n'apparaît dans l'ensemble des lithologies identifiées.

CHAPITRE IV

DISCUSSION

4.1 Variabilité vs superficie

Nous avons fait la démonstration que l'échantillon de placettes se trouvant dans le territoire d'étude présente une forte variabilité de l'IQS, variant de 8 à 25 mètres à 50 ans. L'ensemble des variables impliquées dans les modélisations n'a pu expliquer qu'une faible portion de la variabilité de la croissance du peuplier faux-tremble. Une étude présentée par Ung et al. (2001) a démontré un rôle prépondérant des variables climatiques dans l'explication de l'IQS pour l'ensemble de la forêt commerciale québécoise. Nous avons donc envisagé de tester comment les variables climatiques et les variables de sites expliquent l'IQS à l'échelle d'une unité d'aménagement forestier en supposant que le rôle des variables édaphiques prendrait une plus grande importance relative sur un territoire restreint. Contrairement à ce que nous nous attendions et aux résultats de Ung et al. (2001), aucune variable ou groupe de variables de l'ensemble pédologique et géochimique ou climatique n'est ressortie comme facteur explicatif de l'IQS du peuplier faux-tremble. Notre pouvoir prédictif s'avère donc très faible en se basant uniquement sur les variables des sites dont nous disposions.

4.2 Notion d'échelle

La grande homogénéité des variables sur le territoire peut expliquer le peu de relation entre l'IQS et les variables prises en compte. Or la précision de nos données n'était probablement pas suffisante pour l'échelle à laquelle nous avons travaillé. En effet, nos données provenaient de cartes écoforestières à l'échelle du 1:20 000, 1:50 000 et du 1:250 000. Ces données à l'échelle de l'unité forestière sont probablement assez loin des données réelles de terrain. Ainsi, joindre plusieurs bases de données indépendantes à différentes échelles peut être une source d'erreur. Pourtant Chen (2002) a réussi à prédire 61% de la variation de l'IQS à l'échelle de la Colombie-Britannique en utilisant des variables édaphiques et climatiques semblables à celles dont nous nous sommes servies. La prédiction augmente à 82% lorsqu'il combine ces données avec les différentes zones bioclimatiques comprises sur le territoire d'étude.

En Haute-Mauricie, à l'échelle de l'unité d'aménagement forestier 042-51, les variations de température, de précipitations, de latitude et de longitude ne permettent pas de déceler de grands gradients entre les différentes zones. La faible amplitude des données climatiques pour ce territoire ne peut donner un aussi bon résultat que les régressions effectuées par Chen (2002).

Généralement en foresterie, pour évaluer le potentiel de productivité d'un site, les variables influençant l'IQS sont le couplet dépôts-drainage (Saucier et al. 1994). Or 97% du territoire que nous avons étudié est couvert de till mince à épais et de till mince sur roc et 74,7% de sa superficie présente un drainage de modérément bon à imparfait (classes 3 et 4). La faible variation de ces deux variables sur notre territoire rend impossible ce type d'approche. Pour déterminer les zones à fort potentiel de croissance dans ces unités forestières, il sera donc nécessaire de recueillir des données

telles un MNA plus précis, des données climatiques non modélisées mais bien comptabilisées à l'échelle de la placette-échantillon. Bref, on ne pourra se contenter des bases de données existantes car notre territoire présente très peu de différences entre les sites à fort potentiel et ceux à faible potentiel de croissance.

4.3 Autécologie du peuplier faux-tremble

Ce qui précède implique une tâche colossale et coûteuse. On peut tenter de contourner une partie du problème en se basant sur la littérature existante concernant l'autécologie du peuplier faux-tremble. Comme le peuplier faux-tremble réussit à croître normalement dans la plupart des climats de l'Amérique du Nord (Zasada 1989), la sélection des zones de plantation peut être faite en se basant sur les relations que nous avons trouvées entre l'IQS et le drainage, les dépôts de surface et la lithologie. Le peuplier faux-tremble est sélectif dans son besoin en eau et en nutriments. Le drainage interne vient limiter ou maximiser sa croissance. Sa croissance sera favorisée dans un sol plus épais que 0,6 mètres et moins épais que 2,5 mètres car il recevra ainsi la quantité optimale d'eau pour sa croissance (Zasada 1989). Les sols riches en argiles ne pourront offrir un drainage adéquat dû à la grande rétention de l'eau par les particules. Les sites les plus productifs se retrouvent sur des sols bien drainés, à texture fine. À l'inverse, les mauvais sites sont les moins bien drainés (Shields et al. 1981) et ces sites à drainage imparfait sont dans des sols à textures très variées, tel le till de fond compact.

Nous avons montré que, dans l'ensemble, les zones possédant un bon drainage (classe 20) sont moins favorables à la croissance du peuplier faux-tremble (Figure 2). La croissance est meilleure dans les endroits possédant un drainage modéré à imparfait

(classes 30 et 40). Sur le terrain, nous avons remarqué qu'aucun des sites sur sol bien drainé n'avait un fort taux de croissance. Le drainage est rapide dans les sols sableux, ce qui accélère la perte en éléments nutritifs. Ici, ces sols se développent dans les dépôts de surface de types fluvioglaciaires, et, en conséquence, la croissance ne peut être optimale dans ces dépôts (Strothmann et Zasada 1965). Le peuplier faux-tremble requiert 5 à 6 fois plus de calcium que les autres essences (Bernier 1984) et la lithologie pourrait s'avérer un élément supplémentaire de restriction. Par contre, le territoire ne nous permet pas de déceler non plus le plein potentiel de croissance à partir des cations échangeables dû à une trop grande homogénéité. La seule lithologie pouvant fournir suffisamment de calcium est celle constituée de calcosilicates, schistes, marbres, quartzites et dolomies (lithologie 49).

Selon Ung et al. (2001) l'influence des degrés-jours sur l'IQS du peuplier faux-tremble était de 1,5 m sur l'ensemble de la forêt commerciale du Québec avec une plage de degrés-jours de 935 à 1835 °C. De façon proportionnelle, sur notre territoire à l'étude, la variation de l'IQS attribuable au climat (degrés-jours, déficit de tension de vapeur, précipitations utiles, etc.) serait de 0,65 m. Donc, tout autre facteur étant égal, les sections les plus chaudes, situés en basse altitude auraient une productivité légèrement supérieure. Nous pouvons donc restreindre davantage les zones à haut potentiel de croissance en les localisant en basse altitude car la quantité de degrés-jours s'accroît dans les fonds de vallées. Ajouté à cela la prise en compte des zones ayant un moins bon drainage, il devient possible de limiter et de préciser les zones à meilleur rendement.

4.4 L'IQS représente-t-il bien le potentiel de productivité du site?

Enfin, nous nous interrogeons sur la validité de l'IQS comme indicateur de productivité des sites. Déjà Macfarlane et al. (2000) affirmaient que le rendement prédictif de l'IQS est biaisé car effectué par la densité, et ce, à un âge de 25 ans. Leur étude sur les peuplements de pin taeda (*Pinus taeda L.*) tend à démontrer que le rendement à l'hectare sera faux si l'IQS est utilisé. Par contre, selon Hamel et al. (2004), l'IQS demeure un bon indicateur de productivité forestière (indice de croissance). Dans leur étude, les corrélations (40%) indiquent clairement une relation entre aux degrés-jours, le socle sous-jacent et l'IQS. De plus, en ajoutant certaines caractéristiques chimiques et biologiques du sol, l'explication passe de 40% à 60%. L'IQS ne semble cependant pas applicable à l'échelle à laquelle nous avons travaillé en Haute-Mauricie, soit celle de l'unité forestière d'aménagement. L'échelle qui nous fournissant les données servant au calcul de l'IQS était celle de la placette, mais les données complémentaires servant à améliorer la base de données provenaient de cartes au 1 : 20 000e, au 1 : 50 000e, et au 1 : 250 000e. Donc, l'homogénéité des variables à l'échelle d'un grand territoire ne nous permet pas d'identifier clairement les facteurs de croissance du peuplier faux-tremble.

CONCLUSION

L'objectif initial de ma recherche était d'explorer les liens entre les variables biophysiques actuellement disponibles et la productivité potentielle des sites à l'échelle d'une unité d'aménagement forestier. La croissance en hauteur de tiges de peuplier faux-tremble a été utilisée comme variable indicatrice de la productivité des sites. Il s'agissait en fait de proposer une méthode basée sur l'analyse des facteurs biophysiques affectant l'indice de qualité des stations (IQS) du peuplier faux-tremble, en utilisant une approche bio-statistique et géospatiale afin de déterminer le potentiel de productivité d'un site. Advenant le cas où les résultats seraient probants, il y aurait alors intérêt à transmettre les relations sous forme cartographique, ce qui, par contre, dépasse l'objectif de ce mémoire, mais pourrait faire l'objet de travaux ultérieurs.

C'est un outil manquant à l'heure actuelle mais qui s'avère nécessaire pour l'implantation d'un aménagement écosystémique tel que préconisé par les différentes commissions provinciales, nationales et internationales qui se sont penchées sur la gestion durable des forêts. En effet, le potentiel de croissance des sites forestiers est bien connu selon de grands gradients de climat ou de sol (Chen et al. 2002, Ung et al. 2001, Berges et al. 2005). À l'échelle provinciale, les gradients de température, d'altitude ou de latitude ou encore les grandes unités géologiques produisant des sols riches ou pauvres ressortent très clairement. Mais à l'intérieur d'une unité d'aménagement forestier, où le territoire semble à première vue homogène comme en Haute-Mauricie, dans le Bouclier canadien, c'est l'influence des variables locales, tels

les dépôts de surface, le drainage, les degrés-jours, qui pourrait expliquer les gradients de productivité forestière.

L'outil que nous devions produire devait être rapidement et facilement applicable par les aménagistes forestiers et excluait toute campagne de terrain. La base de données a été construite à partir de données disponibles dans les différents Ministères provinciaux, complétée par des données tirées de MNA au 1:50 000, et de modélisations climatiques simples (BIOSIM). L'indice de qualité des stations (IQS), qui permet de prédire la hauteur de l'arbre à l'âge de 50 ans, un indice couramment utilisé comme indicateur de productivité forestière, a été calculé. Cette variable est très importante car elle précise la qualité et le potentiel de chaque site. Il s'agissait donc de déterminer quelles étaient les variables locales explicatives de cet indice. Les différents traitements statistiques que nous avons appliqués sur ces données ont mis en lumière certaines limites provenant des données associées à cette recherche.

L'IQS était très variable sur notre territoire, mais nous n'avons pu déterminer, avec les données disponibles, une variable ou groupe de variables pouvant prédire la croissance du peuplier faux-tremble. En effet, les corrélations simples ont démontré que seul le calcium et le drainage étaient corrélés significativement à l'IQS au seuil de probabilité fixé à 5%, quoique très faiblement. Les analyses de régressions multiples n'ont pu réussir non plus à faire ressortir des variables importantes. La première modélisation a utilisé douze variables et encore une fois, seul le calcium et le drainage furent significativement probables avec un coefficient de détermination de 0.0847 et 0.0472, respectivement.

Des calculs de corrélations entre chaque variable ont montré que plusieurs variables étaient corrélées entre elles. Nous avons donc retenu les variables suivantes pour une

deuxième modélisation : degrés-jours, calcium, sable, drainage. L'analyse en composantes principales (ACP) a validé cette information, et a confirmé graphiquement que les variables étaient corrélées entre elles. L'ACP précisait que seuls le calcium et le drainage avaient une probabilité significative.

Finalement, après avoir tenté l'approche purement statistique, nous avons opté pour la modélisation de type arborescent. Nous nous sommes servi de classes d'IQS et de l'IQS brut afin de bâtir notre modèle. Nous avons utilisé un arbre de classification et dix validations croisées sur l'ensemble des essais. Nous ne sommes pas parvenus à bâtir un modèle robuste avec ces jeux de données. La moyenne globale des mauvaises classifications s'élevait à 39,78%, donc 6 chances sur 10 de déterminer le potentiel réel du site.

À la lumière de ces résultats, nous estimons que l'information contenue dans les bases de données du MRNFQ existantes est insuffisante pour évaluer les zones à croissance optimale du peuplier faux-tremble à l'échelle de l'unité d'aménagement forestier. Souvent compilées aux 20 000^{ième}, 50 000^{ième} et aux 250 000^{ième}, les cartes écoforestières offraient une faible précision. Une fois les données transposées à l'échelle de l'unité d'aménagement forestier, une perte ainsi qu'un lissage d'information se produit. La base de données du Système d'Information Géominière qui recense les concentrations des cations K, Ca et Mg de sédiments de lacs ne contenait pas les valeurs de notre territoire et nous avons dû extrapoler suivant la méthode *Inverse Distance Weight* (IDW) avec les données situées le plus près possible de notre territoire. Ceci n'était probablement pas suffisamment précis pour notre échelle d'étude. De plus, ces teneurs sont peut-être différentes de celles du réservoir de cations échangeables dans les horizons B des sols développés dans les matériaux glaciaires. Même en ajoutant des données climatiques calculées avec

BIOSIM et des données topographiques tirées de MNA, l'exercice que nous avons mené n'est pas concluant.

Aucune variable n'a pu se démarquer assez clairement comme facteur explicatif de l'IQS du peuplier faux-tremble. L'approche dépôts-drainage communément utilisée en foresterie pour identifier rapidement les sites à meilleur potentiel de croissance n'a pu être envisagée ici étant donnée l'homogénéité du territoire.

Par contre, nous avons tout de même pu mettre en lumière des limitations ainsi que restrictions de plantation. Ces limitations sont aussi liées aux résultats de recherches antérieures (Chen et al. 1998, Chen et al. 2002, Mckenney et al. 2003). L'influence des degrés-jours a un impact direct sur la croissance. De plus, comme l'accumulation des degrés-jours est favorisée dans les fonds de vallée et non en altitude, nous pouvons préconiser les plantations dans ces zones. De plus, un drainage adéquat (bon à rapide), et la recherche des lithologies plus riches en Ca et Mg favoriseraient la croissance.

Il ressort donc de ce mémoire que pour effectuer un zonage écosystémique de type TRIADE en Haute-Mauricie, étant donné l'échelle et l'homogénéité du territoire, il faudrait idéalement compléter les bases de données existantes par des échantillonnages et données acquises sur le terrain et à l'échelle locale. Mais c'est une tâche colossale et coûteuse. Nous avons vu que la croissance du peuplier faux-tremble est favorisée lorsque le drainage est adéquat (modéré à imparfait) et que la concentration de calcium est suffisante, quoique la relation avec l'IQS était très faible. C'est cependant en accord avec la littérature existante dans laquelle on mentionne que les sites les plus productifs sont sur des sols bien drainés, à texture fine, alors que les mauvais sites sont les moins bien drainés (Shields et al. 1981). On

peut donc tenter de délimiter des zones où le drainage est favorable à la croissance de l'espèce. Comme le drainage est rapide dans les sols sableux, puisque la perte en éléments nutritifs y est forte, une cartographie détaillée des dépôts de surface pourrait ici être utile. Couplée à un MNA beaucoup plus précis afin d'extraire des données sur les types de pentes, il serait relativement facile d'en tirer des informations sur le drainage. La variation spatiale du calcium sera cependant plus difficile à évaluer. La roche-mère est assez homogène dans cette région du Bouclier canadien et les sols se développent dans des dépôts glaciaires. Aucun programme de cartographie pédologique n'a été entrepris. Dans ce cas, il devient difficile de se passer d'échantillonnages et d'analyses des cations échangeables des horizons B des sols. Cette conclusion rejoint d'ailleurs celle de Bradley Pinno qui a effectué une thèse de Doctorat à une échelle plus réduite dans notre région et qui comportait des analyses de laboratoire des différents horizons des sols. L'objectif de sa thèse était de comparer deux sources d'informations pour prédire l'IQS du peuplier faux-tremble : 1) les variables tirées de banques de données existantes et 2) les propriétés physiques et chimiques des différents horizons des sols qu'il a prélevés et analysés dans plusieurs pédons à travers notre région d'étude. Il en conclut que les variables traditionnelles tirées des bases de données existantes tels le drainage et le type de dépôt meuble, ne réussissent pas à expliquer l'IQS. Des mesures, prélèvements et analyses des sols sont nécessaires pour prédire l'IQS du peuplier faux-tremble avec le degré de précision exigé à l'échelle de l'unité d'aménagement forestier (Bradley et al. 2009 *sous presse*).

Bien entendu, il faudra tenir compte des contraintes opérationnelles, car les chemins forestiers, les cycles de plantations, les terrains non accessibles ainsi que la superficie totale de la surface de plantation n'ont pas été considérés ici. Le but premier étant de fournir un modèle simple et applicable, le modèle ne pouvait comprendre ce genre de

variables. Le choix des sites devra inclure l'accessibilité afin d'optimiser au maximum leur rendement.

BIBLIOGRAPHIE

Bélanger, N. et Paré, D. 2003. Les sols forestiers peuvent-ils supporter la ligniculture sans fertilisation? *Le Progrès Forestier*, vol.1, p. 12-15.

Bergès, L., Chevalier, R., Dumas, Y., Franc, A. et Gilbert, J.M. 2005. Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) site index variations in relation to climate, topography and soil in even-aged high-forest stands in northern France . *Annals of forest science*, vol. 62, p. 391-402.

Bernier, B. 1984. Nutrient cycling in *Populus*: A literature review with implications in intensively-managed plantations. *IEA/ENFOR* 6: 46p.

Bolduc, A. 1992. Compilation cartographique et caractérisation des dépôts de surface de la région Shawinigan-Trois-Rivières, Québec. Dans *Recherche en cours*, Partie D. Commission géologique du Canada Étude 92-1D p155-164

Boyland, M., Nelson, J. et Bunnell, F.L. 2004. Creating land allocation zones for forest management: a simulated annealing approach. *Canadian Journal of Forest Research* vol. 34, p. 1669-1682.

Boily, A., 2008. Qu'est-ce qui fait pousser la forêt? Ministère de l'Agriculture et des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. Québec

Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A. et Stone C.J. 1984. *Classification and Regression Trees*. Chapman and Hall: New York.

Carmean, W.H. 1975. Forest site quality evaluation in the United-States. *Advances in Agronomy*, vol. 27, p. 209-267.

Castellón, T. D. et Sieving, K. E. 2006. Landscape history, fragmentation, and patch occupancy: model for a forest bird with limited dispersal. *Ecological Applications*, vol.16, p. 2223-2234.

Chen, Y.H., Krestov, P. V. et Klinka K.. 2002. Trembling aspen site index in relation to environmental measures of site quality at two spatial scales. *Canadian Journal of Forest Research*, vol.32, p. 112–119.

Coulombe, G., Huot, J., Arsenault, J., Baucé, E., Bernerd, J.T., Bouchard, A., Liboiron, M.A. et Szaraz, G. 2004. Commission d'étude sur la gestion de la forêt québécoise. Bibliothèque Nationale du Québec, 307 pp.

Davis, L.S. et Johnson, K.N. 2006. *Forest Management*. McGraw-Hill, Inc., New York, 3rd edition.

Doyon, F., Bouffard, D. et Pouliot, R. 2004. Zonage vocationnel et scénarisation intégrée dans l'aire commune 71-21. Rapport technique de l'IQAFF. 67 p. Evans 1999. Sustainability of forest plantations: a review of evidence and future prospects. *International Forestry Review*, vol.1, no.3, p. 153-162

Dumont, M., 2005. Estimation des volumes de bois affectés par les opérations de récoltes. *Ressources Naturelles et Faune*, Québec, 28 pp.

Haas, G.E., Driver, B.L., Brown, P.L. et Lucas, R.C. 1987. Wilderness management zoning. *Journal of Forestry*, vol.85, p. 17-21.

Hamel, B., Bélanger, N. et Paré, D. (2004) Productivity of black spruce and Jack pine stands in Quebec as related to climate, site biological features and soil properties. *Forest Ecology and Management*, vol.191, p. 239-251.

López-Moreno, J.T. et Nogués-Bravo, D. 2006. Interpolating local snow depth data: and evaluation of methods. *Hydrological Processes*, vol. 20, p. 2217-2232.

Macfarlane, David W., Green, E. J. et Burkhart, H. E. 2000. Population density influences assessment and application of site index. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 30, p. 1472-1475.

Mckenney, D.W. et Pedlar, J.H. 2003. Spatial models of site index based on climate and soil properties for two boreal tree species in Ontario, Canada. *Forest Ecology and Management*, vol. 175, p. 497-507.

Messier, C., Bigué, B. et Bernier, P.Y. 2002. Using fast-growing plantations to promote forest ecosystem protection in Canada. *Unasylva*, vol. 56, p. 59-63

Messier, C., Fortin, M.J., Schmiegelow, F., Doyon, F., Cumming, S.G., Kimmins, J.P., Seely, B., Welham, C., et Nelson, J. 2003. Modelling tools to assess the sustainability of forest management scenarios. *In Towards sustainable management of the boreal forest*. Ed. P.J. Burton, C. Messier, D. W. Smith and W. L. Adamovicz. NRC Research Press, Ottawa, Ontario. p. 531-580.

Ministère des Ressources Naturelles, Faune et Parc, 2004. Mise en œuvre des recommandations du rapport de la Commission Coulombe : état de la situation par recommandation. Ministère des Ressources Naturelles et Faune du Québec, 16p.

Organisation des Nations Unies 1993. Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement, principes de gestion des forêts. ONU, New-York.

Paré, D. et Baumier, M. 2005. Données géochimiques des sédiments. Ministère des Ressources Naturelles du Québec, Géochimiste 627-6276, p.5251.

Pinno, B.D., Paré, D., Guindon, L. et Bélanger, N. 2009 *sous presse*. Predicting productivity of trembling aspen in the Boreal Shield ecozone of Quebec using different sources of soil and site information. Forest Ecology and Management

Pothier, D. et Savard, F. 1998. Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestière du Québec. Ministère des Ressources naturelles, Direction des inventaires forestiers, RN98-3054, 183 p.

Régnière, J. et St-Amant, R. 2006. Stochastic simulation of daily air temperature and precipitation from monthly normals in North America north of Mexico. International Journal of Biometeorology, vol. 51, no. 5, p. 425-430.

Richardson, C.W., 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. Water Resources Research, vol. 17, p. 182-190.

Robitaille, A., et Saucier, J.-P. 1998. Paysages régionaux du Québec méridional. Les Publications du Québec, Sainte-Foy, Québec, Canada.

SAS Institute Inc., 2003 Jump In version 5.1, SAS Institute Inc., Cary, NC.

SAS Institute Inc., 2007 Jump In version 7.0, SAS Institute Inc., Cary, NC.

Saucier, J.-P., Berger, J.-P., D'Avignon, H. et Racine, P., 1994. Le point d'observation écologique, normes techniques. Ministère des Ressources Naturelles, direction de la gestion des stocks forestier, Québec, 116p.

Seymour, R.S. et Hunter, M.L. Jr. 1992. New forestry in eastern spruce-fir forests: principles and applications to Maine. Maine agriculture experiment station miscellaneous publications, 716, 36p.

Sherrod P.H. 2003. DTREG. Classification and regression trees for data mining and modelling. www.dtreg.com/DTREG.pdf [July 2005].

Shields, W. J., Jr., et Bockheim J. G. 1981. Deterioration of trembling aspen clones in the Great Lakes region. Canadian Journal of Forest Research, vol. 11, p. 530-537.

Strothmann, R. O., et Z. A. Zasada. 1965. Quaking aspen (*Populus tremuloides* Michx.). In *Silvics of forest trees of the United States*. p. 523-534. H. A. Fowells, comp. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook 271. Washington, DC.

Ung, C.H. Bernier P.Y., Raulier F., Fournier R.A., Lambert M-C. et Régnière J. 2001. Biophysical site index for shade tolerant and intolerant boreal species. Forest Science, vol. 47, p. 83-95.

Verbyla D. L. et Fisher R.F. 1989. An alternative approach to conventional soil-site regression modelling. Canadian Journal of Forest Research, vol. 19, p. 179-184.

Walther, L.F. 1986. The meaning of zoning on the management of natural resources lands. *Journal of environmental management*, vol.22, p. 331-343.

Wang, Y. et Payandeh, B. 1995. A base-age invariant site index model for aspen stand in north central Ontario. *Forest Ecology and Management*, vol. 72, p. 207-211.

Wilks, D.S. 1999. Simultaneous stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation at multiple sites in complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 96, p. 85-101.

www.GeoBase.ca consulté le février 10 janvier 2007

Zasada, J. C. 1989. communication personnelle. USDA Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Corvallis, OR